

## EKSENEL SİMETRİK KABUK YAPILARIN ANALİZİ

Ezgi Zeynep ÖZTORUN<sup>1</sup>, Erdem DAMCI<sup>2</sup>, Namık Kemal ÖZTORUN<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> İstanbul Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul

### ABSTRACT

In the present study; by using symmetry, anti symmetry, axial symmetry properties and maintaining the feature of being the exact solution of the problem; model minimization and more accurate and detailed information acquisition techniques in the minimized model are discussed with examples on the analysis by the Finite Element method. On the other hand, the computer programs "ESKA-2" and "ESKA-4" (Axisymmetric Shell Analysis) which are formulated on the classical shell structure theory and developed within the scope of the study are introduced. By means of these programs, model modifications can be made in an extremely practical way compared to the Finite Element Method in axially symmetric shell structures; load and load combinations, boundary conditions and so on. In addition to all these conveniences, more detailed and more accurate analysis results can be obtained than the Finite Element Method, which can only analyze with a limited number of unknowns with the capacity of computers. ESKA-2 has been developed for the analysis of systems (high walled) where the analysis of the axial symmetric wall with two integral constants is suitable. ESKA-4 is formulated with four integral constants and gives accurate results regardless of the wall height.

### ÖZET

Mevcut çalışmada; simetri, anti simetri, eksenel simetri özelliklerinden yararlanılarak ve problemin kesin çözüm yöntemi olma özelliğini koruyarak; Sonlu Elemanlar yöntemi ile ilgili analizlerde model küçültülme ve küçültülmüş modelde daha doğru ve detaylı bilgi alma teknikleri örneklerle tartışılmaktadır. Diğer tarafta, klasik kabuk yapı teorisi üzerine formülize edilmiş ve çalışma kapsamında geliştirilmiş olan bilgisayar programları "ESKA-2" ve "ESKA-4" (Eksenel Simetrik Kabukların Analizi) tanıtılmaktadır. Söz konusu programlar sayesinde eksenel simetrik kabuk yapılarda Sonlu Elemanlar yöntemine kıyasla son derece pratik bir biçimde model değişiklikleri yapılabilmekte; yük ve yük kombinasyonlarına, sınır şartlarına ve benzeri özelliklere göre sistem optimize edilebilmektedir. Tüm bu kolaylıkların yanı sıra, yalnızca bilgisayarların kapasitesiyle sınırlı sayıda bilinmeyenle analiz yapabilen Sonlu Elemanlar yöntemine kıyasla daha detaylı ve daha doğru analiz sonuçları alınabilmektedir. ESKA-2 eksenel simetrik duvarın iki integral sabiti ile analizinin uygun olduğu (yüksek duvarlı) sistemlerin analizi için geliştirilmiştir. ESKA-4 ise dört integral sabiti ile formülize edilmiş olup duvar yüksekliğine bağlı kalmaksızın doğru sonuç vermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Eksenel simetrik kabuk yapı, Küresel kubbe, Eksenel simetrik duvar, Çembersel kiriş, Dairesel plak, Klasik kabuk yapı teorisi, Sonlu elemanlar yöntemi, Ard çekme, Yapısal optimizasyon

## GİRİŞ

Kabuk yapılar, kalınlıkları diğer boyutlarına ve asal eğrilik yarıçaplarına oranla küçük olan geometrilere sahiptir. Bu tür yapıların yaygın olarak kullanılan Sonlu Elemanlar yöntemi ile analizlerinde çok fazla bilinmeyen serbestlik (degree of freedom) bulunmaktadır. Bu nedenle, bilinmeyenlerin çözümünde, bilgisayarların ve bilgisayar programlarının sınırlarını zorlayan miktarlarda denklem sayısı söz konusu olmaktadır. Bu durumda çoğu zaman teknik sorunlar yaşanmaktadır. Bu sorunların bir kısmı kullanılan bilgisayar programının veya işletim sisteminin getirdiği sınırlamalar ya da bilgisayar donanımı ile ilgili yetersizlikler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sınırlamalar genellikle problemin çözümü esnasında vektör ve matris gibi indisli değişkenler için çok fazla sayıda dinamik depolama alanı (RAM ve benzeri üniteler) gerektirmekte, bu değişkenlerle ilgili işlemler esnasında söz konusu alanlar yetersiz kalabilmektedir. Bilgisayar teknolojilerinin ve yazılımların gelişmesinin yanı sıra; matris işlemlerinde geliştirilen analiz yöntemleri ile ilgili gelişmeler (örneğin tüm hard disk ve benzeri manyetik ya da sayısal depolama alanlarının RAM görevini üstlenecek şekilde tanımlanması veya kare sistem rijitlik matrislerin yalnızca sıfırdan farklı ve simetrik elemanlarının yanı sıra diyagonal üzerindeki elemanların bir vektöre depolanarak evrik (invers) ve diğer matris işlemlerinin bu vektör yardımıyla yapılması) büyük ölçüde sorunların üstesinden gelmiş olsa da, aynı oranda büyüyen ve sınırları zorlayan mühendislik problemleri nedeniyle yetersiz kalmaktadır. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte daha karmaşık sistemlerin analizi ile ilgili beklentiler de artmaktadır. Bu durumda sınırları aşmayan modellerle yetinilen çözümlere gidilmektedir.

İnşaat mühendisliği alanında yaygın olarak kullanılan ve işlem hacmi yüksek olan sistem analiz yöntemlerinden biri Sonlu Elemanlar yöntemidir. Her ne kadar bazı varsayımlar söz konusu olsa da, genel amaçlı Sonlu Elemanlar yöntemi kesin çözüm yöntemi olarak kullanılmaktadır. Yöntem bina türü yapıların yanı sıra diğer yapısal sistemlerde de (baraj, asma köprü, kapalı kondüviler, tüneller, kabuk yapılar gibi yapılar ve hatta uçak, denizaltı, uzay gemisi ve benzeri mekanik sistemlerin parça ve/veya gövde analizlerinde) yapısal sistemlerle ilgili problemlerin çözümünde oldukça başarılı sonuçlar vermektedir. Ancak kesit tesirlerinin lokal olmayan ani değişimler gösterebildiği kabuk yapı ve benzeri problemlerin analizlerinde sonlu elemanlar yöntemi yukarıda bahsedilen sınırlamalarla ilgili sorunlar yaşamakta, problemin karmaşıklığı nedeniyle geometrideki kaçınılmaz olan değişimler, çok fazla sayıda alternatif model analizi gerektirmekte ve yöntem pratik olmamaktadır. Sonlu elemanlar formülasyonu gereği; sonlu eleman türlerinde, eleman geometrisi ile ilgili olarak kenar oran (aspect ratio) köşe açıları, eleman bağlantıları (member connectivity) ile ilgili olarak sağlanması gereken kriterler çoğu kez eleman ve düğüm noktası sayısının ve dolayısıyla bilinmeyen serbestlik sayısının (degree of freedom) artmasına neden olmaktadır. Bu kriterler zaman zaman sağlanamadığı için de “çalıştırma-zamanı (run-time)”, “sözdizimi (syntax)”, ve “yuvarlama (round off)” hatalarına neden olabilmektedir. Kontrol edilmediği takdirde bunlara bağlı olarak sistem rijitlik matrisi ile denklemlerin çözümü esnasında oluşan hatalar sonucunda matris yani denklemler bozulmakta ve son derece yanlış analiz sonuçları alınabilmektedir. İnşaat mühendisliği problemlerinde özellikle bina türü yapılarda sistem geometrisi, kesit ve malzeme özellikleri, sınır şartı ve dış yükler gibi veriler bir analiz için sabit tutularak, farklı yükleme ve kombinasyonları için analiz yapılmaktadır. Yalnızca kesit geometrilerinin optimizasyonu için dahi, çok fazla sayıda model değişiklikleri söz konusu olmaktadır. Diğer taraftan kesin çözüm yöntemlerinin kaçınılmaz olduğu sistemlerde, çoğu kez farklı sınır şartı ve farklı geometrik detayların analizi önem kazanmaktadır. Yüksek uygulama noktalarının ve/veya bölgelerinin değişmesi dahi çok sayıda farklı bilgisayar modelinin hazırlanmasını gerektirmektedir. Söz konusu problemlerin sıkça karşılaşıldığı mühendislik yapılardan biri de kabuk yapılardır.

Eksenel simetrik kabuk yapılar; küresel parabolik veya kısmi küresel kubbe, eksenel simetrik duvar, duvar altında ve/veya üstünde çember kirişi ya da dairesel plak gibi yapısal bileşenlerin kombinasyonlarından oluşmaktadır. Özellikle içeride su basıncı gibi yüklere maruz kalabilen betonarme kabuk yapıların, yapısal emniyetlerinin sağlanmasının yanı sıra su kaçırmaması için çekme gerilmelerine maruz bırakılmaması tercih edilmektedir. Sistem her türlü yükleme ve yük kombinasyonları için basınç altında olmalıdır. Sistemi sürekli basınç altında tutmak için art çekme yöntemi uygulamak, sistemde olası çekme gerilmeleri sıfırlamak, hatta gerekirse makul basınç gerilmelerine dönüştürmek uygun görülmektedir. Tatbik noktaları, yük büyüklükleri, genelde şaşırtmalı yük uygulama sistematığı, sürtünme kayıplarına göre aşamalı yük uygulamaları detaylı analizlerle belirlenmiş yatay ve düşey art çekme yüklerinin uygulanması tercih edilen bir yöntemdir. Ancak sadece yatay art çekme kablolarının yerlerinin optimizasyonu dahi çok sayıda (bazen yüzlerce) farklı matematiksel modelin hazırlanmasını gerektirmektedir. Kesit tesiri dağılımları lokal olmayan ani değişimler gösterebilmektedir [1]. Yine optimum bir tasarım için yapısal bileşenlerin bağlantılarındaki eksantrik oturmalarından ya da sınır şartlarındaki rijitlik dağılımından yararlanılarak hesaba esas kesit tesirleri azaltılabilir veya optimize edilebilir. Bu gereksinim de ilave farklı matematiksel modellerin hazırlanmasını gerektirir. Tüm bu çalışmalar sonlu elemanlar yöntemi ile pratik olarak yapılamamaktadır. Çoğu zaman da problem yukarıda bahsedilen sınırlamalar nedeniyle istenilen detayda analiz edilmemektedir. Problemin bilinmeyen sayısının azaltılarak küçültülmesi ise, ani ve lokal olmayan gerilme dağılımlarının görülemez riskini artırmaktadır. Bu ve benzeri birçok nedenle kabuk yapıların analizinde klasik kabuk teorisi üzerine formülize edilmiş analiz yöntemleri oldukça pratik ve daha doğru sonuç veren alternatif yöntemler olarak önerilmektedir. Yapının, içerisindeki sıvı ile olan dinamik etkileşimi için de pratik yöntemler hatırlatılmakta ve sunulmaktadır.

Öztorun ve Utku [2], eksenel simetrik silindirik duvarların analizlerinde süperpozisyon yöntemini kullanan analitik bir çözüm önermişlerdir. Çalışmalarında yapısal elemanları kubbe, çember kiriş ve silindirik duvar olan su depolarının analizlerini fleksibilite metodunu kullanarak yapmışlardır. Analizleri yapılan su depoları Suudi Arabistan'da inşa edilmiştir [1, 3-5]. Öztorun ve diğ. bir diğer çalışmalarında [6] silindirik duvar analizlerini beş moment denklemleri kullanarak yapmışlardır.

### ALAN DENKLEMLERİ ve FORMÜLASYON

Uzun Duvar Kriterini Sağlayan Kabuk için, Billington yöntemi [7] ile analizde, silindirik bir duvarın genel deplasman ifadesi (1) denklemi ile tanımlanmaktadır [8].

$$D_w \frac{d^4 w}{dy^4} + \frac{E_w \cdot t_w}{r_w^2} w = p \quad (1)$$

İfadedeki  $D_w$ , duvar eğilme rijitliğini;  $t_w$ , duvar kalınlığını (et kalınlığı);  $r_w$ , duvar ortalama yarıçapını;  $E_w$ , duvarın elastisite modülünü,  $w$  doğrusal yer değiştirmeyi ve  $p$  radyal basıncı göstermektedir.

Denklemden  $\beta^4 = \frac{E_w \cdot t_w}{4 \cdot r_w^2 \cdot D_w}$  notasyonunu kullanarak denklem (1) aşağıdaki hali almaktadır.

$$\frac{d^4 w}{dy^4} + 4\beta^4 w = \frac{p_z}{D_w} \quad (2)$$

Elde edilen bu ifade eğilme rijitliği  $D_w$  olan, elastik zemine oturan (sürekli) ve  $p_z$  şiddetindeki yüke maruz prizmatik bir çubuk için elde edilen denklem (3) ile aynıdır.

$$EI \frac{d^4 w}{dy^4} + kw = p_z \quad (3)$$

Bu denklemde  $EI \frac{d^4 w}{dy^4}$  kirişe ait eğilme rijitliği,  $kw$  ise reaksiyon zemin rijitliğidir. Her iki denklem birlikte incelendiğinde  $k$ ,  $E_w t_w / r_w^2$  karşılık gelmektedir. Bu terim silindir duvarın eşdeğer zemin modülü olarak adlandırılabilir.

$$D_w = \frac{E_w \cdot t_w^3}{12(1 - \nu_w^2)} \quad (4)$$

$$\beta^4 = \frac{E_w \cdot t_w}{4 \cdot r_w^2 \cdot D_w} = \frac{3(1 - \nu_w^2)}{r_w^2 \cdot t_w^2} \quad (5)$$

Bu denklemin genel çözümü;

$$w_y = e^{\beta y} (C_1 \cdot \cos \beta y + C_2 \cdot \sin \beta y) + e^{-\beta y} (C_3 \cdot \cos \beta y + C_4 \cdot \sin \beta y) + f(y) \quad (6)$$

Formüldeki yüke bağlı özel çözüm  $f(y)$ ,  $w = \frac{p_z \cdot r_w^2}{E_w \cdot t_w}$  membran çözümünden ibarettir.

Yukarıdaki formülde;  $C_1, C_2, C_3, C_4$  silindir duvarın sınır şartlarına bağlı integral sabitleridir. Duvarın alt ve üst uçlarında kesme kuvveti  $Q_0$  ve eğilme momenti  $M_0$  nedeniyle oluşan doğrusal ve açısal deplasmanlara karşılık gelmektedir. Bu eksenel simetrik yüklerin her biri kendi başına dengede bulunduğu için Saint-Venant prensibinden bu kuvvetlerin silindir duvar üzerindeki tesirlerinin kenara yakın bölgeler içinde kalacağı sonucu çıkarılabilir. Silindir duvar bir uçtaki  $Q_0$  ve  $M_0$  kuvvetlerinin tesiri diğer uca ihmal edilebilecek kadar uzun (yüksek) ise duvarın her iki ucu birbirinden bağımsız analiz edilebilir. Diğer taraftan  $e^{\beta y}$  değerinin  $y$  ile arttığı görülmektedir. Bu nedenle  $C_1$  ve  $C_2$  sıfır olmasa bile tesir sönümlenerek sıfıra yaklaşacaktır. Bu durumda söz konusu sabitler sıfır olarak alınabilir ve fonksiyon pratik sınırlar içerisinde çözülebilir hale getirilebilir. Bu durumda fonksiyon

$$w_y = e^{-\beta y} (C_3 \cdot \cos \beta y + C_4 \cdot \sin \beta y) + f(y) \text{ şekline gelir.}$$

Denklemden  $f(y)$  değeri hesaba katılmadığında yalnızca uç kuvvetlerin etkisi bulunabilmektedir.

$$M_0 = X_2 = \left[ -D_w \cdot \left( \frac{d^2 w}{dy^2} \right) \right]_{y=0} = M_y \quad (7)$$

$$Q_0 = X_1 = \left[ -D_w \cdot \left( \frac{d^3 w}{dy^3} \right) \right]_{y=0} = Q_y \quad (8)$$

$$\frac{dw}{dy} = -\beta \cdot e^{-\beta y} [C_3 \cdot (\cos \beta y + \sin \beta y) - C_4 \cdot (\cos \beta y - \sin \beta y)] \quad (9)$$

$$\frac{dw^2}{dy^2} = 2 \beta^2 \cdot e^{-\beta y} \cdot [C_3 \cdot \sin \beta y - C_4 \cdot \cos \beta y] \quad (10)$$

$$\frac{d^3 w}{dy^3} = 2\beta^3 \cdot e^{-\beta y} [C_3 \cdot (\cos \beta y - \sin \beta y) + C_4 \cdot (\cos \beta y + \sin \beta y)] \quad (11)$$

ifadeleri elde edilmektedir. Uzun ve kısa duvar analizleri için Öztorun ve Utku tarafından geliştirilmiş genel yöntemde [5] ise  $H$  duvarın yüksekliği olmak üzere

$$X_{1w} = \left[ -D_w \cdot \left( \frac{d^3 w}{dy^3} \right) \right]_{y=0}$$

$$X_{2w} = \left[ -D_w \cdot \left( \frac{d^2 w}{dy^2} \right) \right]_{y=0}$$

$$X_{3w} = \left[ -D_w \cdot \left( \frac{d^3 w}{dy^3} \right) \right]_{y=H}$$

$$X_{4w} = \left[ -D_w \cdot \left( \frac{d^2 w}{dy^2} \right) \right]_{y=H}$$

$y = 0$  ve  $y = H$  noktalarında bu denklem bilinmeyen kuvvetler denklemlerinde yerine yazıldığında ve  $X_1, X_2, X_3, X_4$  bilinmeyenlerinin çözümünü içeren 4x4 boyutlarındaki birinci katsayı matrisi  $[KM1]$  elde edilmiştir.  $\{C\}$ , silindir duvarın sınır şartlarına bağlı integral sabitlerini kapsayan vektördür.

$$\{X_w\} = [KM1] \{C\} \quad (12)$$

Aynı yol izlenerek silindirin yer değiştirmeleri (açısal ve doğrusal deplasmanlar) aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$(w)_{y=0} = C_1 + C_3$$

$$\left( \frac{dw}{dy} \right)_{y=0} = C_1 \cdot \beta + C_2 \cdot \beta - C_3 \cdot \beta + C_4 \cdot \beta$$

$$(w)_{y=H} = C_1 \cdot e^{\beta H} \cos \beta H + C_2 \cdot e^{\beta H} \sin \beta H + C_3 \cdot e^{-\beta H} \cos \beta H + C_4 \cdot e^{-\beta H} \sin \beta H$$

$$\begin{aligned} \left( \frac{dw}{dy} \right)_{y=H} &= C_1 \cdot e^{\beta H} [\cos \beta H - \sin \beta H] + C_2 \cdot e^{\beta H} [\cos \beta H + \sin \beta H] \\ &\quad - C_3 \cdot \beta e^{-\beta H} [\cos \beta H + \sin \beta H] + C_4 \cdot e^{-\beta H} [\cos \beta H - \sin \beta H] \end{aligned}$$

Yukarıdaki eşitliklerin katsayıları matris formunda yazıldığında 4x4 boyutlarında bir matris elde edilmektedir. 4x4 boyutlarındaki bu ikinci katsayı matrisi  $[KM2]$  olarak isimlendirilmektedir. Deplasman vektörü  $\{D\}$ ;

$$\{D\} = [KM2] \{C\} \quad (13)$$

Denklem (13) ile,

$$\{D\}^T = \begin{bmatrix} (w)_{y=0} & \left( \frac{dw}{dy} \right)_{y=0} & (w)_{y=H} & \left( \frac{dw}{dy} \right)_{y=H} \end{bmatrix}$$

şeklinde yazılabilir. Duvara ait 4x4 boyutlarındaki fleksibilite matrisi  $[F_w]$  ise (12) ve (13) denklemleri kullanılarak elde edilebilir.

$$[F_w] = [KM 2] \times [KM 1]^{-1} \quad (14)$$

Benzer şekilde, fleksibilite matrisinin evriğinin deplasman vektörü ile çarpımı ile elde edilen bilinmeyenlerin 1., 2., 3. ve 4. değerleri duvara ait bilinmeyenlerdir.

$$\{X\} = [F_w]^{-1} \{D\} \quad (15)$$

### SAYISAL SONUÇLAR

Yapılan çalışma, önceki çalışmanın [9] devamı niteliğindedir. Analizi yapılan sisteme ait bilgiler

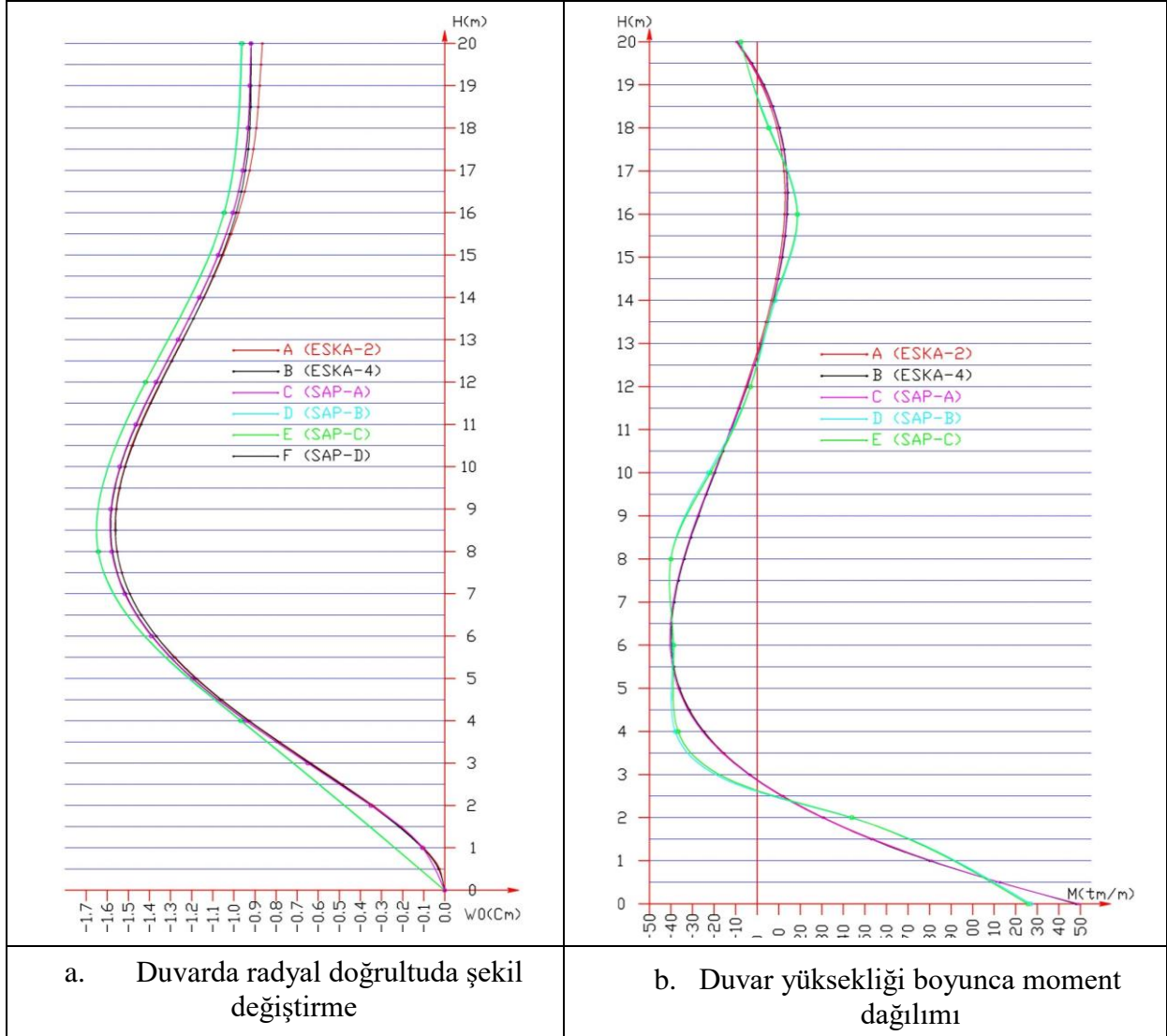
- Duvar yüksekliği: 20 m
- Sıvı yüksekliği: 20 m
- Sıvı özgül ağırlığı: 1.0 tonf/m<sup>3</sup>
- Duvar kalınlığı: 0.65 m
- Duvar kalınlığının ortasına kadar olan yarıçap: 50 m
- Malzeme elastisite modülü:  $2.5 \times 10^6$  tonf/m<sup>2</sup>
- Poisson oranı: 0.2
- Küresel kubbe kalınlığı: 0.25 m
- Kubbe yarıçapı: 86.02325 m
- Kubbe yatay yarıçapı (duvar kalınlığının ortasına kadar): 50.0 m
- Kubbe üzerinde düzgün yayılı yük: 0.625 tonf/m<sup>2</sup>

şeklinde. SAP-A,B,C,D gruplarının tanımları önceki çalışmada [9] verilmiş olup, Şekil 1.a ve 1.b’de ESKA-2, ESKA-4’ün SAP 2000 analiz programı [10] ile birlikte sonuçları görülmektedir. Grafikler aksenal simetrik silindir duvarın yarıçap doğrultusundaki şekil değiştirmelerine ve duvar yüksekliği boyunca moment dağılımına aittir. Klasik kabuk teorisinin formülasyonuna ve işaret notasyonuna uygun olarak sistemin negatif yatay eksen yönündeki (-y yönü yani sol taraf) değerleri sunulmuştur.

Klasik kabuk teorisine göre (fleksibilite yöntemi) bilinmeyenler kuvvetlerdir ve denklem sayısı belirsizlik derecesi (hiperstatiklik derecesi) ile tanımlanmaktadır. Bu değerler mevcut yapısal bileşenler için ESKA-2 programında en fazla 2, ESKA-4 programında ise en fazla 4 olmaktadır. Deplasman ve yer değiştirmeler geriye dönük çözümle bulunmaktadır. Sonlu Elemanlar Yöntemi’nde ise bilinmeyen sayısı serbestlik derecesi (degree of freedom) ile tanımlanmaktadır. Sonlu eleman formülasyonunda (Rijitlik yöntemi) kabuk yapıların analizinde genellikle “shell” eleman türü kullanılmaktadır. Üç boyutlu bu eleman türünün formülasyonunda her düğüm noktasında 5 serbestlik söz konusudur. (altıncı serbestlik henüz araştırma konusudur ve ancak bazı yaklaşımlarla formülasyona kısmen dahil edilebilmektedir.) Bu durumda her düğüm noktasında 5 adet bilinmeyen devreye girmektedir. Sınır şartlarındaki düğüm noktalarında bu sayı sınır şartı koşullarına bağlı olarak azalabilir. Sonlu eleman analizlerinde bilinmeyen sayısının yaklaşık olarak 60000 rakamlarına ulaştığı söylenebilir. Bilinmeyenlerin çözümünden sonra düğüm noktası deplasmanları yani yer değiştirmeleri elde edilmekte ve kesit tesiri dağılımları geriye dönük çözümle elde edilmektedir.

Örnek problemin geometrisi uzun duvar kriterini ( $H \geq \pi/\beta$ ) zorlayacak şekilde seçilmiştir. Neredeyse kısa duvar sınıfındadır ve ESKA-2 programının hata yapma riskini artıracak

değerlerdedir. Bu değerlere rağmen ESKA-2 programı neredeyse ESKA-4 programı ile aynı sonuçları vermektedir. Son derece küçük farklar hesaba esas teşkil etmeyen değerlerdir. Her iki programın sonuçları da son derece başarılı görülmektedir. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile kıyaslandığında aynı başarı yalnızca bilgisayarın ve programın sınırlarını zorlayacak detayda hazırlanmış olan modelde elde edilebilmektedir. Sonlu eleman analiz sonuçlarındaki (SAP-A, B, C, D) sapmalar Şekil 1.b'de daha bariz bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Deplasman hesaplarındaki hatalar geriye dönük çözümle elde edilen kesit tesiri dağılımlarında çok daha büyük hatalara neden olmaktadır.



Şekil 1. ESKA-2, ESKA-4 ile sonlu eleman analiz sonuçlarının (SAP 2000) karşılaştırılması

### SONUÇLAR

Sonlu Elemanlar Teorisi'ne göre analiz yapan bilgisayar programlarında, yapısal elemanlarda istenilen herhangi bir noktada doğrudan analiz sonuçlarının görülebilmesi, yapısal sistemin modeli hazırlanırken söz konusu noktada düğüm noktası tanımlanması ile mümkün olmaktadır. Analiz sonuçları istenilen noktada düğüm noktası tanımlansa dahi, elde edilen sonuçlar bu noktayı içine alan sonlu eleman parçasının ağırlık merkezindeki değer olmaktadır. Bu nedenle sonlu eleman programları ile yapılan analizlerde sonuçların hassas olması veya istenilen belirli bir noktada sonuç elde edebilmesi, sistemin daha çok sayıda sonlu eleman ile modellenmesini gerektirmektedir. Tanımlanabilecek sonlu eleman sayısı, bilgisayar

programlarının ve kullanılacak bilgisayarın teknik kapasitesine bağlıdır. Tanımlanan sonlu eleman sayısının artması halinde; gerek modelin hazırlanması, gerek analizlerin gerçekleştirilip yorumlanması aşamalarında işlem hacmini artıran, vakit gerektiren bir iş haline gelmektedir. Buna karşın, geliştirilen program ile yapısal elemanların tanımlanması ve tanımlanan herhangi bir noktada istenilen analiz sonuçlarının alınması son derece pratiktir.

### KAYNAKLAR

- [1] N.K., Öztorun, Eksenel simetrik ve ard çekme yükleri altında su depolarının inşaatı, *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası XV. Teknik Kongresi*, Ankara, Kasım 1999, 27-42.
- [2] N.K., Öztorun, M., Utku, E., Çıtıpıtıoğlu, Silindirik Su Tanklarının Klasik Kabuk Teorisini Kullanarak Bilgisayarlarla Analizi, *VIII. Ulusal Mekanik Kongresi*, Antalya, Eylül 1993 510-523, 1993.
- [3] N.K., Öztorun, M., Utku, E., Çıtıpıtıoğlu, Dairesel plaklı silindirik su tankları, *IX. Ulusal Mekanik Kongresi*, Antalya, Eylül 1995 571-580.
- [4] N.K., Öztorun, M., Utku, Ard Çekme Yükleri Altında Betonarme Su Depoları. *Yapı Dünyası Aylık Mesleki Bilim Teknik ve Haber Dergisi*, Ekim 2001, S:67 ISSN 1300-977X.
- [5] N.K., Öztorun, M., Utku, Computer aided design of post – tensioned concrete reservoirs, *Computers & Structures*, vol. 80 (2002), s. 2195-2207. doi:10.1016/s0045-7949(02)00244-4.
- [6] N.K., Öztorun, S., Altın, Ö., Anıl, Eksenel Simetrik Silindirik Duvarların Beş Moment Denklemi ile Analizi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 11(2), 1996, 55-72.
- [7] D.P., Billington, *Betonarme kabuk yapılar* (Çeviren; Karataş, H., Pultar, M.), Çağlayan Basımevi, İstanbul, 1975.
- [8] S.P., Timoshenko, S., Woinowsky-Krieger, *Theory of plates and shells 2nd edition*, McGraw-Hill, New York, 1984.
- [9] E.Z., Öztorun, E., Damcı, N.K., Öztorun, Eksenel Simetrik Yapıların Sonlu Elemanlar İle Analizinde Model Hazırlama Teknikleri, *Yapı Dünyası Aylık Mesleki Bilim Teknik ve Haber Dergisi*, Sayı 218-219, 2014, s. 17-22; ISSN 1300-977X.
- [10] SAP2000 Structural Analysis Program Computers and Structures, Inc. Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional Structures.